

引用格式:吴其华,赵锋,艾小锋,等. 对步进线性调频成像雷达的间歇采样转发干扰方法[J]. 信息对抗技术, 2023, 2(1):12-20. [WU Qihua, ZHAO Feng, AI Xiaofeng, et al. Interrupted sampling repeater jamming against stepped-frequency linear frequency modulation signal radar[J]. Information Countermeasure Technology, 2023, 2(1):12-20. (in Chinese)]

对步进线性调频成像雷达的间歇采样转发干扰方法

吴其华,赵锋*,艾小锋,刘晓斌,顾赵宇,肖顺平

(国防科技大学电子科学学院,湖南长沙 410073)

摘要 针对步进线性调频信号(steped frequency-linear frequency modulation, SF-LFM)体制雷达对抗问题,提出了一种基于子脉冲间歇采样的干扰方法。通过对截获 SF-LFM 信号的子脉冲进行交替采样与转发,在雷达成像处理后可形成沿距离向延拓的逼真假目标。在此基础上对其干扰特性与参数设计问题进行了讨论,并分别通过一维理想散射点仿真与某型飞机二维成像数据仿真实验验证了所提方法有效性。

关键词 间歇采样转发干扰;步进线性调频信号;雷达干扰;成像雷达

中图分类号 TN 955 **文章编号** 2097-163X(2023)01-0012-09

文献标志码 A **DOI** 10.12399/j.issn.2097-163x.2023.01.002

Interrupted sampling repeater jamming against stepped-frequency linear frequency modulation signal radar

WU Qihua, ZHAO Feng, AI Xiaofeng, LIU Xiaobin, GU Zhaoyu, XIAO Shunping

(College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract In this paper, the jamming method using sub-pulse interrupted sampling modulation was proposed against stepped frequency-linear frequency modulation(SF-LFM) imaging radar. The proposed method could form multi-false-target deception jamming spreading along the range direction by alternately sampling and repeating the intercepted sub-pulses. On the basis of this, the jamming features and parameter setting principles were further discussed. Finally, the validity of the proposed method was demonstrated by one-dimensional single scatterer and two-dimensional data simulations of an aircraft, respectively.

Keywords interrupted sampling repeater jamming(ISRJ); stepped frequency-linear frequency modulation signal(SF-LFM); radar jamming; imaging radar

0 引言

以合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)与逆合成孔径雷达(inverse SAR, ISAR)为

代表的宽带成像雷达通过宽带信号发射以及方位上的合成孔径处理可以获取目标尺寸、形状等高分辨信息,在空间监视、防空反导、遥感测绘等重大军用和民用领域均发挥着重要作用^[1-2]。因

收稿日期:2022-08-22

修回日期:2022-09-26

通信作者:赵锋, E-mail: zhaofeng_nudt@163.com

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62001481, 61890542, 62071475);湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ40561);国防科技大学科研计划项目(ZK22-46)

此,宽带雷达干扰技术一直是雷达对抗领域的焦点问题之一^[3-5]。

间歇采样转发干扰(interrupted sampling repeater jamming, ISRJ)通过对雷达信号以欠奈奎斯特率进行交替采样与转发,可在雷达接收处理后形成多个逼真假目标。从信号体制上看,当前大部分 ISRJ 干扰研究是针对线性调频信号(linear frequency modulation, LFM)体制雷达。文献[6]首次对间歇采样转发干扰基本原理进行了系统阐述,此后 ISRJ 干扰技术不断发展;文献[7-14]进一步对 Dechirp 雷达、SAR、ISAR 等不同 LFM 雷达的间歇采样转发干扰问题进行了研究。除此以外,部分研究也关注了相位编码信号的 ISRJ 干扰问题。如文献[15]针对 m 序列相位编码雷达,提出了一种预测转发的间歇采样导前假目标干扰方法;文献[16]进一步提出了一种基于数字射频存储器(digital radio frequency memory, DRFM)的间歇采样预测转发干扰方法。从以上研究可以看出,由于具有实现简单、效果灵活等优势,ISRJ 干扰技术已成为当前雷达对抗领域不可或缺的重要手段。

对于宽带成像雷达来说,具有较大时宽带宽积的 LFM 信号为其最常用的波形。近年来,随着合成宽带理论的提出与发展,各类合成宽带信号在宽带雷达中得到广泛运用。步进线性调频信号(steped frequency-LFM, SF-LFM)通过多个窄带 LFM 子脉冲进行宽带合成的方式实现目标高分辨成像^[17-22]。由于其大大降低了对于雷达发射机瞬时带宽的要求,SF-LFM 信号已成为宽带雷达成像常用信号之一,因此对 SF-LFM 信号体制成像雷达对抗问题的研究具有极其重要的现实意义。然而,如何对 SF-LFM 信号体制成像雷达实施 ISRJ 干扰以及所产生干扰特点与参数设计要求等问题尚未见到公开报道。基于此,本文针对 SF-LFM 成像雷达对抗问题,研究了对其进行 ISRJ 干扰的方法原理以及干扰特性。利用其多子脉冲合成宽带处理特点提出了基于子脉冲间歇采样转发的干扰方法,并分别通过一维散射点与某型飞机数据仿真对所提方法有效性进行了验证。

1 步进线性调频雷达成像模型

如图 1 所示,设 SF-LFM 信号由 N 个频率顺

序步进的窄带 LFM 子脉冲构成^[21]。第 i 个子脉冲频率可表示为 $f_i = f_0 + i\Delta f$,其中, $i=0,1,\dots,N-1$, f_0 为信号载频, Δf 为相邻子脉冲的频率间隔。SF-LFM 信号可以表示为:

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - iT_r}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_i(t - iT_r) + j\pi k(t - iT_r)^2) \quad (1)$$

式中, T_r 为子脉冲重复间隔(pulse repetition interval, PRI), T_p 为子脉冲宽度, $k = B/T_p$ 为子脉冲调频斜率, B 为子脉冲信号带宽, $\text{rect}(t/T_p) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T_p/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ 。

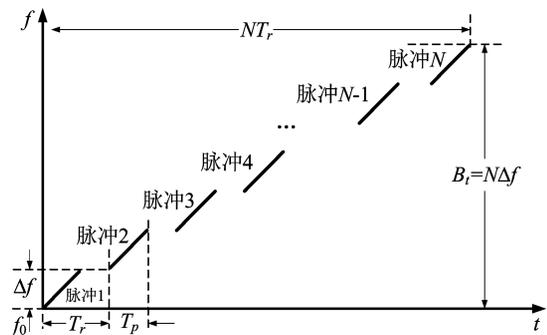


图 1 步进线性调频信号示意图

Fig. 1 SF-LFM signal

假设目标与雷达之间距离为 R ,则雷达接收到的信号回波可以表示为:

$$s_r(t) = \sigma s(t - \tau) = \sigma \sum_{i=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - \tau - iT_r}{T_p}\right) \cdot \exp(j2\pi f_i(t - \tau - iT_r) + j\pi k(t - \tau - iT_r)^2) \quad (2)$$

式中, $\tau = 2R/c$ 为目标回波时延, c 为电磁波传播速率, σ 为目标散射系数。

雷达接收到回波后,每个子脉冲分别进行脉冲压缩处理。根据 LFM 信号脉冲压缩性质,可得每个子频点的脉压输出为:

$$y(t, i) = \sigma \sqrt{BT_p} \text{sinc}(\pi B(t - iT_r - \tau)) \cdot \exp(-j2\pi f_i \tau) \quad (3)$$

式中, $\text{sinc}(x) = (\sin x)/x$ 。

取采样时刻为 $t = iT_r + \tau$,得到每个子频点的输出采样为:

$$m(i) = \sigma \sqrt{BT_p} \exp(-j2\pi f_i \tau) = \sigma \sqrt{BT_p} \exp(-j2\pi(f_0 + i\Delta f)\tau) \quad (4)$$

对 $m(i)$ 进行 N 点的 DFT 变换,可得到目标的高分辨距离像表示为:

$$h(k) = \sigma \sqrt{BT_p} \exp(-j2\pi f_0 \tau) \text{sinc}(\pi(k - N\Delta f \tau)) \quad (5)$$

式(5)在 $k_0 = N\Delta f \tau$ 处取得峰值,其距离分辨率 $\Delta r = \frac{c}{2N\Delta f}$,则等效带宽为 $B_e = N\Delta f$ 。在获得目标的高分辨距离像 $h(k)$ 后,进一步进行方位成像处理,即可得到目标二维图像。

2 对 SF-LFM 雷达的间歇采样转发干扰

2.1 干扰原理

间歇采样转发干扰通过欠采样矩形脉冲串

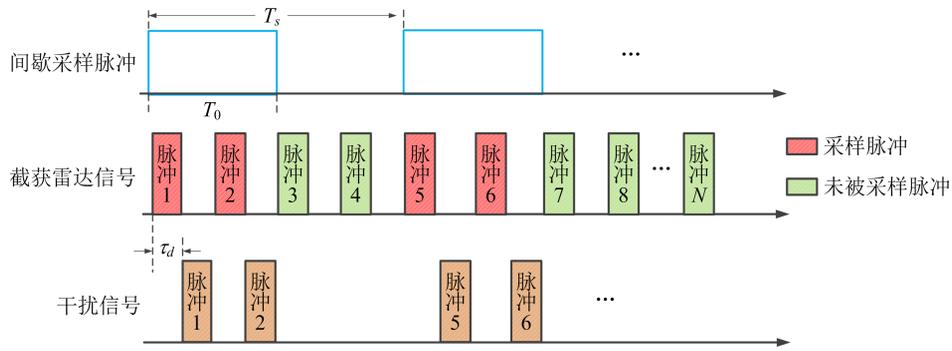


图2 SF-LFM子脉冲间歇采样转发干扰原理

Fig. 2 Jamming principles of interrupted sampling repeater against SF-LFM radar signals

根据文献[6],间歇采样脉冲可以表示为:

$$p(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_0}\right) \otimes \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_s) \quad (6)$$

式中, \otimes 为卷积运算, $\delta(\cdot)$ 为冲激函数, T_s 为间歇采样周期, T_0 为间歇采样脉宽,则间歇采样占空比定义为 $\eta = T_0/T_s$ 。

对式(6)进行傅里叶变换,得到其频谱为:

$$P(f) = f_s T_0 \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}(nf_s T_0) \delta(f - nf_s) \quad (7)$$

式中, $f_s = 1/T_s$ 为间歇采样频率。

需要特别指出的是(如图2所示),当间歇采样脉冲为针对子脉冲处理时,间歇采样脉宽与周期均须为截获雷达信号子脉冲 PRI 的整数倍。因此可以假设 $T_0 = N_0 T_r$, $T_s = N_1 T_r$,其中 N_0 与 N_1 分别为一个间歇采样周期内采样脉冲以及总脉冲个数。间歇采样占空比可以表示为 $\eta = N_0/N_1$ 。

根据以上假设,间歇采样转发后的干扰信号表示为:

$$s_j(t) = p(t)s(t) \quad (8)$$

根据 SF-LFM 信号的成像处理流程,在经过子脉冲匹配滤波处理后,得到的粗分辨距离像序

对截获雷达信号进行交替采样与转发,从而在雷达成像后形成沿距离向延拓的多个逼真假目标。对于 SF-LFM 信号来说,其通过多窄带子脉冲的合成宽带实现高分辨成像。如果对其进行子脉冲内间歇采样转发,则可在每个子脉冲的粗分辨距离像上形成多个假目标干扰,然而在多个子脉冲合成宽带图像过程中,由于假目标与真目标并不在一个粗分辨距离单元,因此在目标所在单元对应的高分辨图像上无法形成干扰。基于此,提出针对子脉冲处理的间歇采样转发干扰方法,干扰原理如图2所示。

列表示为:

$$m_j(i) = p(i)m(i) \quad (9)$$

式中, $p(i)$ 为 $p(t)$ 在各个子脉冲上的离散抽样,表示为:

$$p(i) = \text{rect}\left(\frac{i}{N_0}\right) \otimes \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(i - nN_1) \quad (10)$$

根据式(7)的傅里叶变换关系,对 $p(i)$ 进行 N 点 DFT 变换后得到的频域为:

$$\begin{aligned} P(k) &= \frac{N_0}{N_1} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}\left(\frac{N_0}{N_1}n\right) \delta\left(k - \frac{N}{N_1}n\right) \\ &= \eta \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}(\eta n) \delta\left(k - \frac{N}{N_1}n\right) \end{aligned} \quad (11)$$

则对 $m_j(i)$ 进行 N 点 DFT 变换得到的干扰信号高分辨距离像可以表示为:

$$\begin{aligned} h_j(k) &= \text{DFT}(m_j(i)) \\ &= \text{DFT}(m(i)) \otimes \text{DFT}(p(i)) \\ &= h(k) \otimes P(k) \\ &= \eta h(k) \otimes \left(\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}(\eta n) \delta\left(k - \frac{N}{N_1}n\right) \right) \\ &= \eta \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \text{sinc}(\eta n) h\left(k - \frac{N}{N_1}n\right) \end{aligned} \quad (12)$$

从式(12)可知,对 SF-LFM 信号进行子脉冲间歇采样所得到的干扰信号成像处理后得到的高分辨距离像为不同时延多阶假目标的线性叠加,其中第 n 阶假目标距离像为:

$$h_j(k)|_n = \eta \text{sinc}(\eta n) h\left(k - \frac{N}{N_1}n\right) \quad (13)$$

2.2 干扰特性分析与参数设计

2.2.1 假目标位置

根据式(13)可得,第 n 阶假目标的位置为:

$$k_n = n \frac{N}{N_1} \quad (14)$$

根据定义可得 N_1 与间歇采样频率 f_s 的关系满足:

$$N_1 = \frac{1}{f_s T_r} \quad (15)$$

因此,式(14)可以重写为:

$$k_n = n N f_s T_r = n f_s T_t \quad (16)$$

式中, $T_t = N T_r$ 为 SF-LFM 信号的等效总脉宽。

则对应 n 阶假目标时延与距离分别为:

$$t_n = \frac{1}{B_t} k_n = \frac{f_s T_r}{\Delta f} n \quad (17)$$

$$r_n = \frac{c}{2} t_n = \frac{c f_s T_r}{2 \Delta f} n \quad (18)$$

相邻假目标之间的时延与间距为:

$$\Delta t = \frac{f_s T_r}{\Delta f} \quad (19)$$

$$\Delta r = \frac{c f_s T_r}{2 \Delta f} \quad (20)$$

根据上面分析可知,对某一固定参数 SF-LFM 信号间歇采样干扰形成的假目标间隔与间歇采样频率 f_s 成正比。

在一定程度上,LFM 信号可以看作 SF-LFM 的一种特殊表现形式(即子脉冲宽度等于子脉冲重复间隔)。因此,这里对 2 种信号形式 ISRJ 干扰所产生假目标位置间隔的关联性进行讨论。

根据文献[6],对 LFM 信号 ISRJ 干扰形成的假目标间隔可以表示为:

$$\Delta r' = \frac{c f_s}{2k} \quad (21)$$

式中, k 为 LFM 信号调频斜率。

将式(20)进行变形,可写为:

$$\Delta r = \frac{c f_s T_r}{2 \Delta f} = \frac{c f_s}{2 \Delta f / T_r} = \frac{c f_s}{2k'} \quad (22)$$

式中, $k' = \Delta f / T_r = B_r / T_t$ 可认为是 SF-LFM 信

号等效调频斜率, B_r 和 T_t 分别为已在前面定义的 SF-LFM 信号等效带宽与等效总脉宽。

比较式(21)和(22)可知,如将 SF-LFM 信号所有子脉冲等效合成为一个长 LFM 信号,并定义出式(22)中的等效调频斜率,则两者的 ISRJ 干扰假目标位置特性在形式上具有一致性。

2.2.2 假目标个数

对于 SF-LFM 信号,其成像处理不模糊范围为 $r \in \left[-\frac{c}{4\Delta f}, \frac{c}{4\Delta f}\right]$,则单边成像不模糊的范围

为 $R_r = \frac{c}{4\Delta f}$,假设 0 阶假目标位于成像中心,通过间歇采样在其成像范围内可形成的有效假目标个数为:

$$\begin{aligned} N_j &= 2 \times \left\lfloor \frac{R_r}{\Delta r} \right\rfloor + 1 = 2 \times \left\lfloor \frac{N_1}{2} \right\rfloor + 1 \\ &= 2 \times \left\lfloor \frac{f_s T_r}{2} \right\rfloor + 1 \end{aligned} \quad (23)$$

式中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整操作。

需要指出的是,根据式(13),由于产生的假目标幅度额外受一个 $\text{sinc}(\cdot)$ 函数调制,当某阶假目标恰好位于 $\text{sinc}(\cdot)$ 函数的零点时,将不能在干扰图像上显现,因此实际雷达图像上可观测到的假目标数量将可能小于式(23)给出的理论值。

2.2.3 假目标幅度

根据式(13),第 n 阶假目标的幅度可以表示为:

$$A_n = \eta \text{sinc}(\eta n) \quad (24)$$

从式(24)可以看出,生成假目标的幅度主要与间歇采样占空比 η 有关。根据上面分析,间歇采样占空比可以表示为 $\eta = N_0 / N_1$,其中 N_0 与 N_1 分别为一个间歇采样周期内采样脉冲以及总脉冲个数。因此在一个固定的间歇采样周期内,采样脉冲数 N_0 越大,各阶假目标的幅度也越大。

2.2.4 干扰参数设计要求

对于宽带目标而言,假设目标在距离向的长度为 L ,为保证形成的各阶假目标在图像上不产生混叠,则形成的假目标间距必须不小于目标长度,即:

$$\Delta r \geq L \quad (25)$$

因此,间歇采样频率 f_s 须满足:

$$f_s \geq \frac{2L\Delta f}{cT_r} \quad (26)$$

另一方面,为在雷达图像上形成多假目标干扰,假目标间隔必须小于 SF-LFM 信号的不模糊成像距离,即:

$$\Delta r \leq R_r \quad (27)$$

则:

$$f_s \leq \frac{1}{2T_r} \quad (28)$$

实质上,式(28)也表明了对 SF-LFM 雷达进行 ISRJ 干扰的技术应用相比于传统 LFM 信号雷达的特殊之处。根据文献[6],对 LFM 雷达进行有效 ISRJ 干扰的条件为间歇采样频率小于信号带宽,即 $f_s < B$ 。在此条件下,干扰机仅需要保证雷达信号带宽的约束,干扰实施较为简单,具有更大的策略选择灵活性。而对 SF-LFM 雷达而言,由于多子脉冲合成宽带成像的特点使得其成像不模糊范围远小于传统 LFM 雷达,要在其较小的不模糊成像范围内形成 ISRJ 的多假目标欺骗效果,在间歇采样频率的选择上显然要比 LFM 雷达限制更大(即满足式(28)的要求),且需要测量子脉冲重复间隔 T_r ,因此 ISRJ 干扰实施的难度要大于 LFM 雷达。

2.3 干扰流程

根据以上分析,所提 SF-LFM 雷达间歇采样转发干扰方法的流程如图 3 所示。

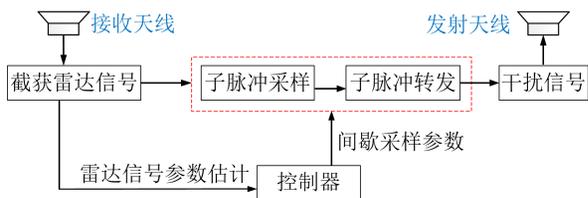


图 3 SF-LFM 雷达间歇采样转发干扰流程

Fig. 3 Procedure of ISRJ against SF-LFM radar

首先,干扰机通过接收天线截获雷达辐射信号,并进行信号参数估计,主要包括 SF-LFM 信号的子脉冲重复间隔 T_r 、频率间隔 Δf 等。

其次,控制器根据信号参数估计结果结合公式的限制生成间歇采样转发干扰参数,包括间歇采样频率 f_s 与采样占空比 η ,并进行子脉冲的交替采样与转发。

最后,将得到的干扰信号进行功率放大后通过发射天线辐射至拟干扰的雷达。

3 仿真结果与分析

假设雷达发射 SF-LFM 信号参数如下:信号载频 $f_0 = 10$ GHz,每个 LFM 子脉冲宽度 $T_p = 1 \mu\text{s}$,带宽 $B = 1$ MHz,调频斜率 $k = B/T_p = 10^{12}$ Hz/s,子脉冲 PRI $T_r = 10 \mu\text{s}$,合成子脉冲总个数为 $N = 256$,相邻子脉冲频率间隔 $\Delta f = 1$ MHz,则等效成像带宽 $B_i = N\Delta f = 256$ MHz。

3.1 一维理想散射点实验

3.1.1 不同间歇采样频率 f_s 对干扰效果的影响分析

假设间歇采样占空比 $\eta = 0.5$,图 4 给出了不同间歇采样频率下的干扰信号一维高分辨距离像。

从图 4 可以看出,对 SF-LFM 信号进行间歇采样干扰后,形成了多个沿距离向延拓的假目标,这说明对 SF-LFM 信号间歇采样干扰的有效性。从图中可以看出,在 f_s 为 25、12.5 以及 6.25 kHz 时,相邻假目标的距离 Δr 分别为 37.94、19.12 以及 9.7 m,且各阶假目标的幅度受 $\text{sinc}(\cdot)$ 函数调制,与理论计算一致。

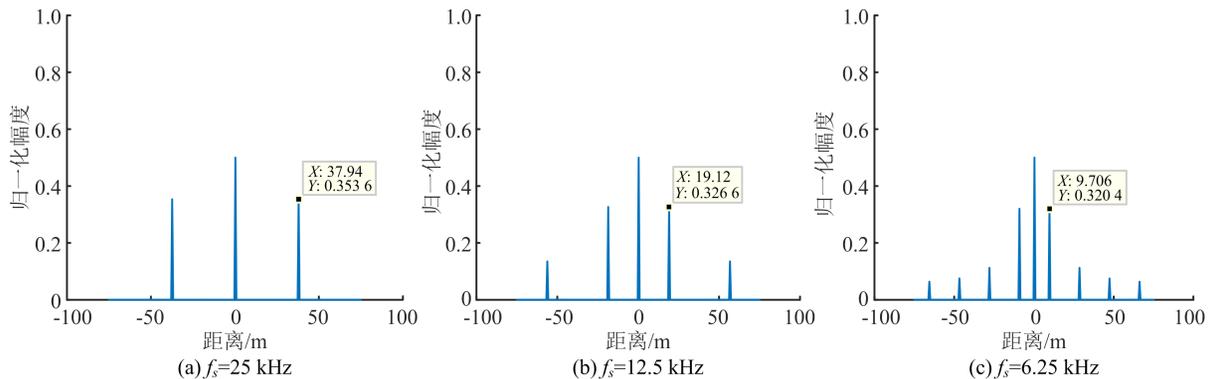


图 4 不同间歇采样频率的干扰一维距离像

Fig. 4 Jammed range profiles with different interrupted sampling frequency

3.1.2 占空比 η 对干扰效果的影响分析

假设间歇采样频率 $f_s = 12.5$ kHz,图 5 给出了不同占空比下的干扰结果。

从图 5 可以看出,占空比主要影响所产生的假

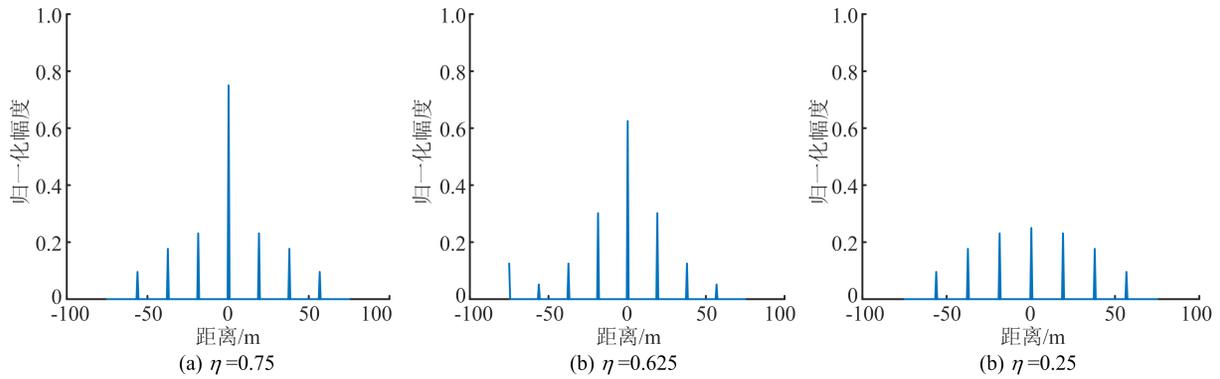


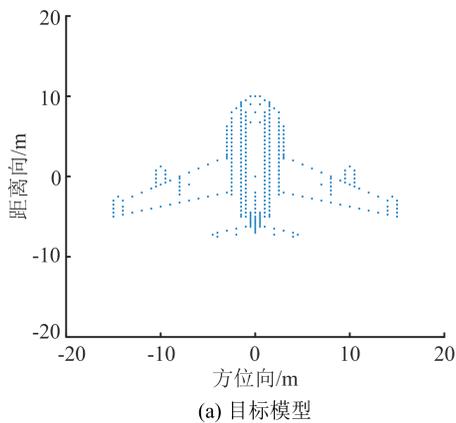
图 5 不同占空比的干扰一维距离像

Fig. 5 Jammed range profiles with different duty ratio

3.2 某型飞机二维数据仿真实验

用一组如图 6(a)所示的 330 点某型飞机仿真数据对所提方法有效性进行验证,所用飞机散射点模型参考文献[21]。假设雷达方位成像观测孔径数 $M = 256$,每个孔径 PRI 为 1 ms。图

目标幅度,0 阶假目标幅度正比于间歇采样占空比。此外,与图 4 比较可以看出,当占空比为 0.5 时,其偶数阶假目标由于处于 $\text{sinc}(\cdot)$ 函数的零点而消失,图 5 中其他占空比时其偶数阶假目标正常出现。



6(b)给出了未干扰条件下原始成像结果,如图所示,飞机距离向长度 16.5 m,方位向长度为 30 m。

假设间歇采样占空比为 0.25,图 7 给出了不同间歇采样频率下的干扰图像。

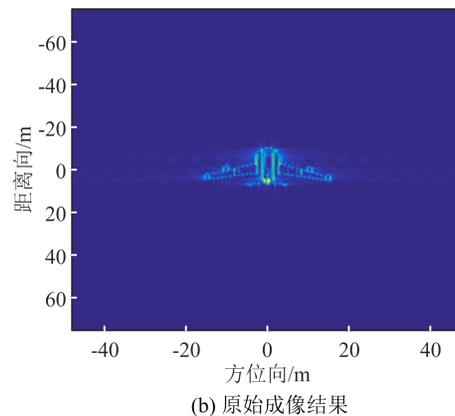


图 6 某型飞机模型仿真数据

Fig. 6 Simulation data of a certain type of plane

从图 7 可知,对 SF-LFM 信号进行间歇采样干扰后,在图像上出现了沿距离向延拓的多个假目标,且随着假目标阶数的增加,幅度渐次下降,证明了所提方法的有效性。此外可以看出,间歇采样频率越小,假目标间隔越小,在雷达成像范围内形成的假目标个数也越多。然而,随着间歇采样频率的减小,生成假目标的间隔小于目标距离向的长度时,假目标图像将发生混叠。如图 7(c)所示,当间歇采样频率 $f_s = 6.25$ kHz 时,各阶假目标混叠严重,影响了干扰效果。根据式(26)理论计算,在本

场景下间歇采样频率 $f_s \geq 11$ kHz 时,可保证生成假目标不发生混叠,图中结果与理论计算一致。

图 8 进一步给出了占空比为 0.5 时的干扰图像。从图中可以看出,当占空比为 0.5 时,由于偶数阶假目标正好位于 $\text{sinc}(\cdot)$ 函数的零点位置,因此并未出现在图像上,最终的干扰图像可呈现出距离上非均匀假目标效果。

最后,为证明所提子脉冲间歇采样转发干扰方法的优势,图 9 给出了几组不同参数下子脉冲内间歇采样转发的干扰图像。

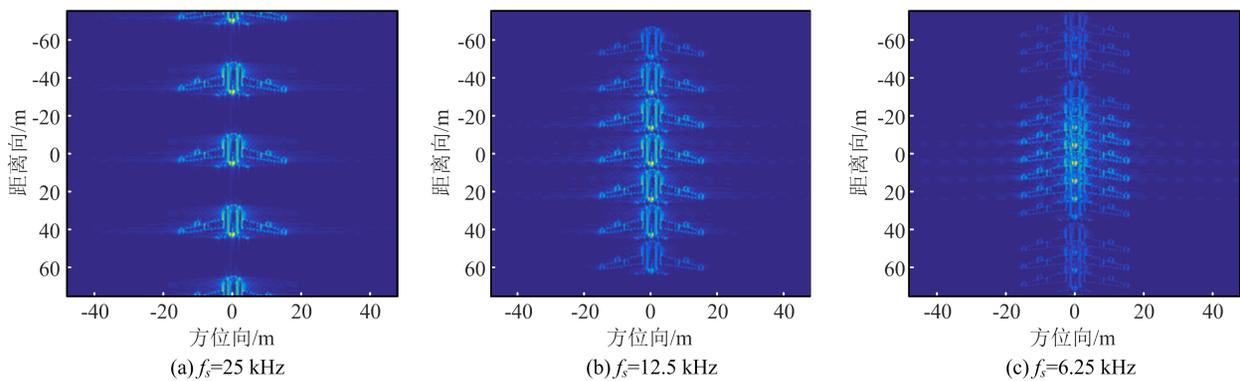
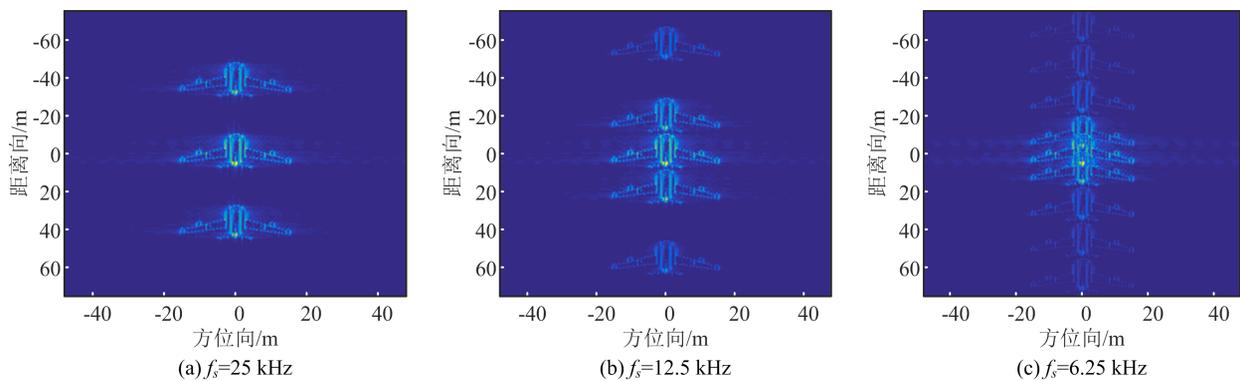
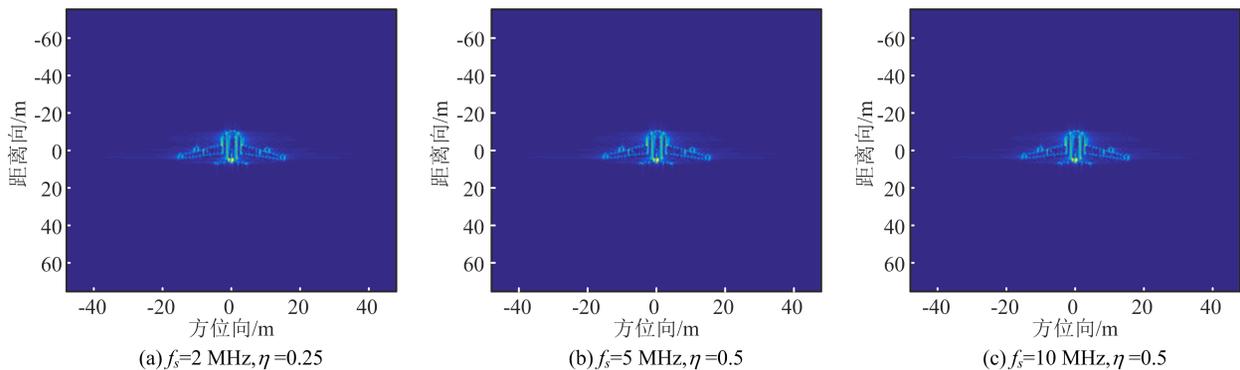
图7 不同间歇采样频率的干扰二维图像(占空比 $\eta=0.25$)Fig. 7 Jammed image with different interrupted sampling frequency ($\eta=0.25$)图8 不同间歇采样频率的干扰二维图像(占空比 $\eta=0.5$)Fig. 8 Jammed image with different interrupted sampling frequency ($\eta=0.5$)

图9 子脉冲内间歇采样转发干扰二维图像

Fig. 9 Jammed image with intra-pulse ISRJ

从图9可以看出,在几组不同的间歇采样频率下子脉冲内间歇采样转发干扰均只生成了单个的假目标,而无法形成上面本文所提方法的多假目标干扰效果。这是因为虽然上述子脉冲内间歇采样频率 f_s 小于 SF-LFM 信号带宽,如图9中最大的 f_s 值为 10 MHz 仍明显远小于信号总带宽 256 MHz,但由于 SF-LFM 信号成像不模糊范围较小,传统脉冲内间歇采样形成的假目标间距超出了其成像范围,因此在其成像范围内仅能观测到一个主假目标干扰。而本文所提的子脉

冲间歇采样转发干扰方法实质上是通过对子脉冲内采样与转发的方法等效地降低了间歇采样频率,从而使得可在 SF-LFM 信号成像范围内形成多个假目标,实现更好的欺骗干扰效果。因此上述仿真证明了所提 SF-LFM 雷达子脉冲内间歇采样转发干扰方法的优势。

4 结束语

本文针对 SF-LFM 成像雷达对抗问题,利用其多个窄带子脉冲合成宽带的特点,提出了基于

子脉冲的间歇采样转发干扰方法,并对假目标间隔、产生的假目标个数、假目标幅度等干扰特性以及间歇采样频率等参数设计要求进行了详细分析与推导,并通过仿真实验证明了该方法的有效性。然而当前研究仅从距离向上的间歇采样干扰给出了初步分析与结果,后续将从距离方位二维联合调制以及非均匀调控等方面进一步深入探究更为丰富的对 SF-LFM 信号体制成像雷达的间歇采样干扰效果。

参 考 文 献

- [1] WU L, WEI X Z, YANG D G. ISAR imaging of targets with complex motion based on discrete chirp fourier transform for cubic chirps[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(10): 4201-4212.
- [2] WANG F, EIBERT T, JIN Y. Simulation of ISAR imaging for a space target and reconstruction under sparse sampling via compressed sensing[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(6): 3432-3441.
- [3] CHANG X, LI Y, XHAO Y. An improved scattered wave deceptive jamming method based on a moving jammer beam footprint against a three-channel short-time SAR GMTI[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(4): 4488-4499.
- [4] ZHOU F, ZHAO F, TAO M, et al. A large scene deceptive jamming method for space-borne SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(8): 4486-4495.
- [5] 黄大通, 邢世其, 李永祯, 等. 基于乘积调制的 SAR 灵巧干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(11): 3160-3168.
HUANG Datong, XING Shiqi, LI Yongzhen, et al. Smart jamming method against SAR based on multiplication modulation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(11): 3160-3168. (in Chinese)
- [6] WANG X, LIU J, ZHANG W, et al. Mathematic principles of interrupted-sampling repeater jamming (ISRJ)[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2007, 50(1): 113-123.
- [7] FENG D J, TAO H M, YANG Y, et al. Jamming de-chirping radar using interrupted-sampling repeater [J]. Sciece China (Information Sciences), 2011, 54(10): 2138-2146.
- [8] DENG D J, XU L T, PAN X Y, et al. Jamming wideband radar using interrupted-sampling repeater [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2017, 53(3): 1341-1354.
- [9] 吴晓芳, 王雪松, 卢焕章. 对 SAR 的间歇采样转发干扰研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 2043-2048.
WU Xiaofang, WANG Xuesong, LU Huanzhang. Study of intermittent sampling repeater jamming to SAR [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(5): 2043-2048. (in Chinese)
- [10] 潘小义, 王伟, 冯德军, 等. 对解线频调 ISAR 的间歇采样转发干扰[J]. 宇航学报, 2013, 34(9): 1274-1280.
PAN Xiaoyi, WANG Wei, FENG Dejun, et al. Jamming dechirping ISAR based on intermittent sampling repeater [J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(9): 1274-1280. (in Chinese)
- [11] 房明星, 毕大平, 沈爱国. SAR 多普勒移频间歇采样转发干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(10): 2287-2295.
FANG Mingxing, BI Daping, SHEN Aiguo. Doppler shift-frequency intermittent sampling repeater jamming for SAR [J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(10): 2287-2295. (in Chinese)
- [12] 降佳伟, 吴彦鸿, 王宏艳, 等. 基于多相位分段调制的间歇采样转发干扰[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(7): 1450-1458.
JIANG Jiawei, WU Yanhong, WANG Hongyan, et al. Intermittent sampling repeater jamming based on multiple phases sectionalized modulation [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(7): 1450-1458. (in Chinese)
- [13] WU Q H, ZHAO F, AI X F, et al. Two-dimensional blanket jamming against ISAR using nonperiodic ISRJ [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(11): 4031-4038.
- [14] 张云鹏, 毕大平, 房明星, 等. 多通道 SAR-GMTI 二维间歇采样延时转发干扰[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(11): 2448-2455.
ZHANG Yunpeng, BI Daping, FANG Mingxing, et al. 2-D intermittent sampling time-delay repeater jamming to multi-channel SAR-GMTI [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(11): 2448-2455. (in Chinese)
- [15] 徐乐涛, 冯德军, 赵晶, 等. 对相位编码体制雷达的导前假目标干扰[J]. 宇航学报, 2013, 34(1): 133-138.
XU Letao, FENG Dejun, ZHAO Jing, et al. Preceded false targets jamming against phase coded radars[J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(1): 133-138. (in Chinese)
- [16] 张鹏程, 王杰贵. 基于 DRFM 的间歇采样预测转发干

扰分析[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(4): 795-801.

ZHANG Pengcheng, WANG Jiegui. Jamming technique of intermittent-sampling predictive repeater based on DRFM [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(4): 795-801. (in Chinese)

- [17] 王樾, 白雪茹, 周峰. 基于稀疏步进调频信号的低信噪比逆合成孔径雷达成像[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 1034-1043.

WANG Yue, BAI Xueru, ZHOU Feng. High-resolution inverse synthetic aperture radar imaging with sparse stepped-frequency chirp signals under low signal to noise ratio[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 1034-1043. (in Chinese)

- [18] 孙玉雪, 罗迎, 张群, 等. 基于线性调频步进信号的空间自旋目标时变三维成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(1): 23-31.

SUN Yuxue, LUO Ying, ZHANG Qun, et al. Time-varying three dimensional imaging for space rotating targets with stepped-frequency chirp signal[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(1): 23-31. (in Chinese)

- [19] 陈怡君, 李开明, 张群, 等. 稀疏线性调频步进信号 ISAR 成像观测矩阵自适应优化方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(3): 509-516.

CHEN Yijun, LI Kaiming, ZHANG Qun, et al. Adaptive measurement matrix optimization for ISAR imaging with sparse frequency-stepped chirp signals [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(3): 509-516. (in Chinese)

- [20] 朱丰, 张群, 李松, 等. 稀疏线性调频步进信号弹道导弹进动微多普勒特征重构与提取方法[J]. 兵工学报, 2013, 34(1): 76-81.

ZHU Feng, ZHANG Qun, LI Song, et al. Reconstruction and extraction methods for Micro-Doppler feature of ballistic missile precession with sparse frequency-stepped chirp signal [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1): 76-81. (in Chinese)

- [21] ZHANG L, QIAO Z, XING M, et al. High-resolution ISAR imaging with sparse stepped-frequency waveforms [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(11): 4630-4651.

- [22] ZHOU F, TIAN X, WANGY, et al. High-resolution ISAR imaging under low SNR with sparse stepped-frequency chirp signals[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(10): 8338-8348.

作者简介

吴其华

男, 1990年生, 博士, 讲师, 研究方向为雷达电子对抗

E-mail: wuqihua13@nudt.edu.cn



赵锋

男, 1978年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达电子战建模仿真与评估

E-mail: zhaofeng_nudt@163.com



艾小锋

男, 1983年生, 博士, 副研究员, 研究方向为双基地雷达成像、特征提取

E-mail: anxifu2001@163.com



刘晓斌

男, 1990年生, 博士, 副教授, 研究方向为雷达系统建模与仿真

E-mail: xiaobinat08@yeah.net



顾赵宇

男, 1984年生, 博士, 讲师, 研究方向为雷达对抗

E-mail: guzhaoyu_nudt@163.com



肖顺平

男, 1964年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达系统建模与仿真

E-mail: xiaoshunping_nudt@163.com



责任编辑 安 蓓